

林火對土壤生態系之影響

文 ■ 劉美娟 ■ 東華大學自然資源管理研究所碩士生

王巧萍 ■ 林業試驗所福山研究中心助理研究員

一、前言

去年五月，梨山發生近10年來國有林班火災被害面積第三大之森林大火，一共波及185公頃林地，燒毀127公頃的森林，在媒體長達七天的現場及時報導下，廣泛引起各界的關切。事實上，台灣是個森林火燒相當頻繁的地區。根據林務局的統計，1992-2001年間，台灣國有林班地十年間共發生大小火燒736次，損害森林面積達6,418.1公頃。由於火燒並不常發生在一般人的生活環境中，所以在媒體的報導下，使得普羅大眾將火燒視為絕大的災害。事實上，林火其實就如同降雨、風、閃電的發生一般，火山爆發、自燃現象、閃電的發生等皆有可能引發森林火燒。而在特定的空間與時間尺度的考量之下，火燒雖為生態系中的一巨大擾動(disturbance)，但對於某些生態系而言（例如澳洲的桉樹森林或台灣的二葉松林），常態性的火燒則可能是維持此類生態系的關鍵因子。

土壤是建構陸域生態系的基礎，土壤的改變對生態系之初級生產力、生物量、養分和水的循環、生物歧異度及後續之演替等，

皆扮演著舉足輕重的角色。據文獻記載，在控制燃燒(prescribed burning)下，地表最高溫度可達1,000°C以上，使得土壤表層之有機質焚燬殆盡，土壤團粒亦受破壞。此外，火燒焚燬植群與枯枝落葉層所產生的灰分且可溶性高極易水解，可隨土壤水淋洗進入土體，進而影響土壤物理與化學性質。火燒影響土壤物、化性質變異的程度與火燒狀態及火燒當時所達溫度（火燒強度）、持續時間及發生頻度有關，而火燒的溫度則受到燃料類型、枯枝落葉層特性（厚度、密度、含水率）、土壤特性（質地、有機質含量、含水率）等因素所控制。因為環境因子與土壤本身的特性使其對火燒反應的差異極大，所以火燒對土壤生態系的影響不能一概而論。臺灣也處潮濕多雨的亞熱帶，並不容易發生自然性的林火，而根據研究統計，臺灣之森林火災絕大多數是人為所引發的。過去臺灣學界對林火的研究多集中在地上之植被部分，因此本文將針對火燒對土壤生態系之影響做一概括性的介紹，以提高民眾在火災對森林生態系影響上的認識，期能減少林火的發生。

二、火燒對土壤物理性質之影響

(一) 表土溫度

一般而言，火燒後土壤溫度的改變僅侷限在土壤表層。由於林冠疏開使大量陽光直射入林，可導致裸露的表土溫度上升；而火燒跡地堆積大量未燃燒完全的黑色有機殘體，亦使得表土有較高的吸熱能力。植被的破壞和土壤表層反射率及熱傳等性質的改變，均導致表土溫度之高低溫差異加劇。然隨著植被的恢復，表土溫度之變化亦趨緩和。

(二) 土壤團粒與孔隙率及土壤沖蝕

火燒的高溫使土壤有機質含量減少，導致土壤膠體之膠結能力(cementation)減弱。土壤團粒遭到破壞，平均土壤粒徑下降，加以地表裸露，雨滴可直接打擊表土，因此火燒地之土壤團粒穩定性顯著變差。此外，火燒所產生的灰分下洗將阻塞土壤孔隙，使土壤孔隙率及入滲速率(infiltration)降低，以致雨水較不易滲入地下而增加地表逕流。由於火燒後林地上具高儲存水分之枯枝落葉等有機層減少，亦使得林內水分涵養能力降低，使雨水更容易由逕流而流失。而火燒之高溫(260-315℃)亦導致黏質土壤中膠體的聚合，形成斥水土層(water-repellent soil layer)，導致雨水不易滲入而形成逕流，並產生各種沖蝕，所以國外研究上常有「泥濘中的灰燼痕跡Dusty tracks in mud」現象的記載。

三、火燒對土壤化學性質之影響

火燒會焚燬地上部植群及地表枯枝落

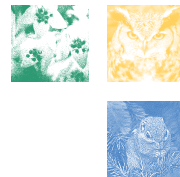
葉，急速氧化並改變土壤有機質形式，進而影響土壤的化學性質。焚燒所急速釋放出來的養分，一部分如碳、氮、硫等會揮發逸失，另一部分可溶性無機養分如鉀、鈣、鎂、鈉等則向下淋溶，或為植物所利用。

(一) 酸鹼度

土壤酸鹼度(pH值)變化的程度及持續時間，需視原有的土壤酸鹼度、燃燒產生的灰分總量及其土壤本身化學性質與當地降雨量等因子而定。一般而言，火災後由於有機酸損失，及植物體燃燒成灰分可釋放出大量可溶性陽離子，均會使土壤pH值上升。而pH值的提升則可促進土壤微生物(尤指細菌)的活性，進而加速土壤之礦質化並提高氮的有效性。但相對的，若火燒強度不足以使燃料完全燒成灰燼，則產生大量死亡的植物殘體；在火燒地缺乏植被以致土溫上升且高低溫差變大的情況下，植物殘體分解速度加快，反而產生更大量的有機酸累積在土壤表層，而導致火燒地pH值下降。此外，火燒後之降雨亦會將灰分物質的沖失，加以火燒地之植物更新時吸收大量的陽離子，均可能使土壤pH值下降。

(二) 可交換性陽離子

火燒對土壤可交換性陽離子(如鉀、鈉、鈣、鎂)含量的影響主要是受控由土壤性質、植物吸收、灰分影響、土壤水的淋失與有機質的含量等。大部分的研究報告指出，火燒後因為灰分重新釋放出陽離子而置換出土壤所吸附之氫離子，可使得土壤中可交換性鉀、鈣、鎂、鈉的濃度增加。但相對



的，雖然火燒所導致之溫度很少能高到將陽離子揮發而逸失的程度，但由於火燒地土壤裸露、日照充足導致土溫升高，有助於植物之快速生長，所以在植被更新時根部的吸收速率往往快於非火燒區，而可能造成火燒區土層中之鉀、鈣、鎂、鈉濃度低於非火燒區。

(三) 土壤有機質

火燒產生的熱導致土壤中的碳、氮因高溫分解，以 CO_2 、 N_2 的型態釋放到空氣中，而使得土壤有機質含量降低。有機質減少之程度除受控於火燒強度及火燒型態外，還依火燒時間的長短、強度、燃料含水率及土壤深度而異。一般而言，樹冠火(crown fire)使土壤有機質增加，而地表火(surface fire)和地下火(ground fire)則會降低有機質含量。

(四) 氮

林火可將土壤及植物體中之氮素以氣化(gasification)、揮發(volatilization)及灰飛(ash convection)的形式逸失。雖然土壤中的全氮量會因火燒而損失，但長時間來說，火燒對全氮量並沒有太顯著的影響。因為氮雖然在火燒的過程中會逸失，但火燒卻能加速有機殘體之礦質化作用，也因此火燒後土壤中有效型態之氮(NH_4^+ 和 NO_3^-)含量會增多。此外，火燒致使土溫及pH值之提高等，亦有利於生物固氮作用的進行，而彌補部分所損耗掉的氮。

四、火燒對於土壤生物的影響

土壤中因為有大量的微生物、植物根

系、菌根、無脊椎動物及小型哺乳動物等生物存在，所以可視為「活的」。而火燒對土壤生物來說，除了火燒本身會直接削減其生物量外，火燒所導致上述土壤物理化學性質的改變，亦左右著土壤生物之生物量、活性與組成。就長時間來看，火燒造成植被的破壞與土壤環境的改變，加以火燒地氣候狀況之變化等影響，可能比火燒本身的影響還大。臺灣至目前有關這一部分之資料仍十分貧乏，實有待進一步的調查研究。

(一) 土壤微生物

土壤微生物意指體積小於0.1mm的原生動物(線蟲、輪蟲等)、細菌，真菌及藻類等。土壤微生物除可將養分固定下來防止流失外，其對於有機質的分解、氮的循環、腐植質的形成均有所助益，並具有促進土壤團粒及穩定土壤中養分的循環等功能。由於土壤氮循環影響火燒地後續的植群演替和碳循環，所以土壤微生物對火燒之森林生態系的修復扮演重要的角色。

火燒所釋放的熱可以直接傷害甚至殺死土壤微生物(火燒溫度達50-210°C即可致命)，對族群量、活力及組成造成衝擊。林火對土壤微生物的衝擊程度視火燒特性(包括強度、最高溫度、延燒時間、熱傳入土壤的深度)而定，而在多項影響因子中土壤含水量扮演著極為重要的角色。因為濕土中的水傳導熱的速度更快，更會造成微生物的大量死亡，而在乾土之中因其隔熱效果反而可保護部分微生物避免受害，特別由於微生物多喜歡在濕土中活動，所以被火燒影響更大。

火燒除了改變土壤有機質的含量外，對於土壤有機質的性質及組成上亦有影響，因而在火燒地中，土壤微生物的種類會隨著當地枯枝落葉、腐植質、火燒後殘存物等有機質的性質與組成的改變而改變。火燒地和非火燒地土壤微生物種類的差異主要表現在枯枝落葉層及土壤表層，在礦質土層中的土壤微生物組成差異是不大的，可能是因為生存在礦質土中的微生物較少之故。此外，不同種類的土壤微生物對火燒的反應亦不一。由於真菌及細菌在土壤微生物中佔有很大的生物量，且此兩種土壤微生物對火燒本身及火燒後環境的改變反應不一，所以分別就火燒對真菌及細菌的影響作一簡單的介紹。

1. 真菌

大多數的真菌在土壤溫度超過50°C的時候就會死亡，且火燒後土壤酸鹼值的提升對真菌生物量的回復造成不利的影響，這是因為細菌和真菌所適應pH值範圍不同（細菌喜歡土壤pH值較高的環境，真菌則喜歡的pH值較低的土壤）所致。另外火燒後土壤溫度的上升亦不利於真菌生長，所以火燒區的真菌生物量往往難以回復。

2. 細菌

大體來說細菌可分為兩大類群—自營性細菌(autotrophic bacteria)與異營性細菌(heterotrophic bacteria)，前者能直接利用無機碳、氮為生，後者則依賴分解有機碳、氮存活，而大多數的細菌屬於化學性異營生物。

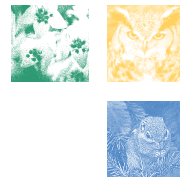
火燒時，由於土壤表層及植物體中的有機碳被氧化以CO₂的形式離開生態系，導致

土壤有機質輸入的減少，致使異營性細菌可利用的養分減少，所以在中強度的火災之後，常會有大量的異營性細菌死亡；而若火燒強度不足，殘存的植物體及根系則可能成為異營細菌其初級碳源養分的來源。但對於自營性細菌來說，情況可能是截然不同的。火燒雖然也會削減自營性細菌的生物量，然而某些自營性細菌（特別是跟氮循環有關的菌種）在火災後數量反而激增，其生物量甚至高於火燒前。這是由於高溫揮發抑制微生物生長的物質，且火災去除了植被對NH₄⁺的吸收，使得土壤中的硝化菌有充分的NH₄⁺可供生理之需。火燒雖然消除了植物對土壤無機氮的競爭有利於硝化菌之增長，但長期來看，硝化作用所形成的NO₃⁻以及脫硝作用(denitrification)的產物N₂、N₂O等，均非常容易流失而使土壤含氮量減少，復又限制了硝化菌的生物量。

火燒後表土溫度的升高可促進部分細菌的活性而加快土壤有機質的分解速率，且土壤pH值的升高亦有助於部分細菌族群量的建立。某些存在於土壤中的細菌和藻類的冬眠孢子會因為熱度的刺殺而大量地萌發，所以適度的火燒會刺激某些火災適存的微生物大量發生。基於上述種種可知，火燒後細菌和藻類族群的回復是比真菌更為快速的。

3. 火燒後氣候變化對土壤微生物的影響

火燒後的氣候狀況對於當地土壤微生物的恢復亦有密切的關係。火燒後遽減的微生物量常常因為雨季來臨而開始增加。以細菌生物量為例，初春土壤回溫，且因雪融養分



重新釋放，細菌生物量增加，火燒區的土壤微生物量比非火燒區更早達極大值，但一進入較乾旱的夏季，細菌生物量馬上減少，而真菌生物量的波動多少也有隨著季節變化的趨勢。另外有研究指出，土壤呼吸量（用以代表土壤微生物的活性）在火燒後急遽降低，而在雨季發生時快速增加。由此可知，火燒後的氣候變化，如乾濕季的交替影響土壤含水率，亦左右著土壤微生物量及活性。所以就長期來說，當地氣候環境的改變對土壤微生物的影響可能比火燒本身更為重大。

（二）土壤動物

土壤動物是指整年或一年中某段時期生活在林地腐植質及礦質土壤層的動物，其中有許多進進出出於此兩層之間的動物，其活躍在腐植層或土壤層則乃視該動物的發育期及當時的環境條件而異，也因此火燒對土壤動物的影響會依動物的習性、活動力、耐熱與耐旱的能力而不同。以土壤無脊椎動物為例，蟻類受焚燒的影響遠較其他動物為小，因為蟻類已經能適應昔日焚燒高溫表土與乾燥的環境，加上蟻類的隱蔽習性(cryptic habits)，常能生存在高溫焚燒的環境，其社會組織也能很快的在火燒區重建或移居他處。但火燒後由於土壤水的改變及食物來源的減少將會大量削減蚯蚓的族群量，所以火燒造成土壤環境的改變對土壤動物的影響可能是比火燒本身還大的。一般而言，火燒後地表及土壤有機質的減少使得以有機質為生的土壤小型動物數量受到限制，而小型動物數量的減少亦影響了大型動物的數量。

五、結論

火燒會改變林地土壤及地表覆蓋層之理化性質與植生狀況。火燒焚燬地被植物及部分有機質層，並使表層裸露、土壤溫度上升、加速有機質分解，以致造成其有機物含量及全氮量之降低，並改變土壤水和當地的溫度狀況。然而，殘留地面之灰分物質含有可溶性且能夠被植物直接吸收利用之無機態礦質養分，可使表層土壤pH值及有效性養分顯著增加，形成對土壤生物或植物有利之生長環境，所以，火燒對生態系來說並不全是負面的。但由於台灣歷年來的森林大火多肇因於人為疏失而焚燬大片森林、草地，再加上臺灣山高水急，火燒後的水土流失使大眾皆視火為災。然而臺灣的林火除了危害林火與動物棲地及水土保持外，是否在森林生態系的結構與功能上扮演著其他的角色，尤其是對土壤生態系這個陌生的領域，實有待更進一步的研究。🌱



（圖片 / 高遠文化）